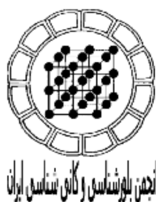
مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

سال بیست و ششم، شمارهٔ دوم، تابستان ۹۷، از صفحهٔ ۳۶۹ تا ۳۸۲



سنگ‌نگاری، زمین‌شیمی و جایگاه زمین‌ساختی واحدهای آتشفشانی منطقه شاه سلطان علی (جنوب غربی بیرجند)

سمانه نادرمزرجی، محمدحسن کریم‌پور*، آزاده ملکزاده شفارودی

گروه زمین‌شناسی و گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(دریافت مقاله: ۹۶/۲/۲۶، نسخه نهایی: ۹۶/۷/۴)

چکیده: سنگ‌های آتشفشانی منطقه شاه سلطان علی در جنوب غربی بیرجند و در بخش شرقی پهنه لوت رخنمون دارند. براساس بررسی‌های سنگ‌نگاری، این سنگ‌ها بازالت تا آندزیت بوده و کانی‌های اصلی آنها پلاژیوکلاز، کلینوپیروکسن، هورنبلند و بندرت بیوتیت و الیوین هستند. آپاتیت و زیرکن به عنوان کانی فرعی در این واحدها شناسایی شده‌اند. واحدهای آندزیتی و آندزیت- بازالتی دگرسانی پروپلیتی ضعیف تا متوسط را نشان می‌دهند. این واحدها متاآلومین هستند و در گستره سنگ‌هایی با ماهیت آهکی-قلیایی پتاسیم بالا تا شوشونیتی قرار می‌گیرند. برپایه داده‌های زمین‌شیمیایی، منطقه مورد بررسی با پهنه فرورانش شرق ایران (پهنه افغان- پهنه لوت) در ارتباط است. اینکه از نظر زمین‌ساختی، واحدهای منطقه در کمان قاره‌ای جای می‌گیرند، همچنین غنی‌شدگی از عناصر سنگ دوست بزرگ یون مانند K ,Ba ,Sr و Cs نسبت به عناصر با پتانسیل یونی بالا (Nb - Ti و Zr) همراه با ناهنجاری منفی Nb نشان‌دهنده تشکیل ماگما در پهنه فرورانش است. خاستگاه ماگمای تشکیل‌دهنده آندزیت و آندزیت- بازالت‌های منطقه، براساس نسبت Ta/Yb, Th/Yb ,Ba/La و Th/Nd گوشته دگرنهاد شده است و سیال‌های حاصل از فرورانش در غنی‌شدگی گوشته نقش بسزایی داشته‌اند. نسبت $(La/Yb)_N$ (۴٫۹۰ تا ۱۰٫۵۹) به همراه الگوی عناصر کمیاب نشان‌دهنده وجود مقدار جزئی گارنت در خاستگاه است که الگوسازی‌های انجام شده نشان می‌دهد، که ماگمای مولد واحدهای سنگی از ذوب‌بخشی ۵ تا ۲۰ درصد اسپینل گارنت لرزولیت حاصل شده است.

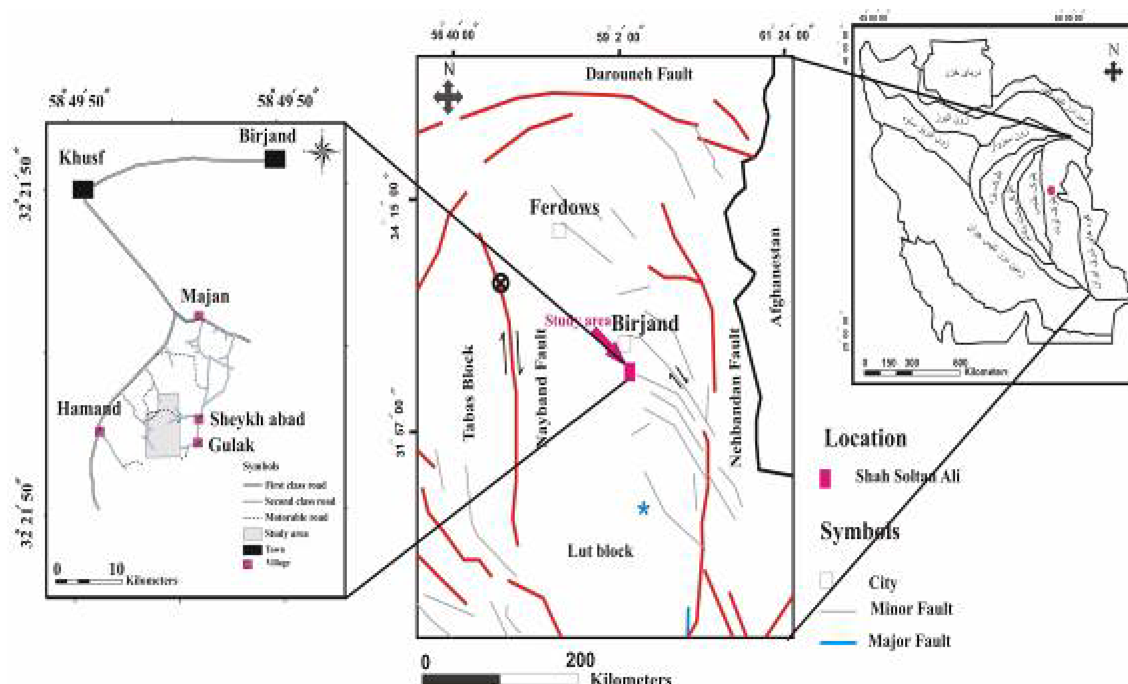
واژه‌های کلیدی: *پلاژیوکلاز؛ آهکی قلیایی؛ متاآلومین؛ فرورانش؛ پهنه لوت؛ بیرجند.*

مقدمه

منطقه اکتشافی شاه سلطان علی در ۵۰ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان خوسف (۸۵ کیلومتری جنوب غربی بیرجند) واقع است. این منطقه در بخش شمال شرقی ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ سرچاه شور [۱]، با وسعتی بیش از ۳۷ کیلومتر مربع، بین طول‌های جغرافیایی شرقی ″۵۰ ′۵۶ °۵۸ تا ″۰۰ ′۰۰ °۵۹ و عرض‌های جغرافیایی شمالی ″۳۹ ′۲۵ °۳۲ تا ″۱ ′۳۰ °۳۲ قرار دارد. از نظر تقسیمات ساختاری، این منطقه جزئی از شرق پهنه لوت است (شکل ۱). یکی از مشخصه‌های بارز پهنه لوت فعالیت ماگمایی گسترده در آن است، به طوریکه فعالیت‌های ماگمایی لوت که از ژوراسیک آغاز شده، در کرتاسه ادامه داشته و در ترشیری به اوج خود رسیده است [۲]. برپایه بررسی‌های صورت گرفته، سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی ترشیری بیش از نیمی از پهنه را پوشش می‌دهند. ترکیب این واحدهای سنگی بیشتر از گدازه‌های بازالتی، آندزیتی، داسیتی و ریولیتی است که توسط توده‌های نفوذی نیمه عمیق قطع شده‌اند. تاکنون علت‌های مختلفی برای فعالیت ماگمایی ترشیری پهنه لوت پیشنهاد شده است، به گونه‌ای که برخی فرورانش [۳-۵]، و برخی مانند پانگ و همکاران [۶]، فرآیندهای لایه لایه شدن پس از برخورد را عامل آن دانسته‌اند، بر اساس این نظریه،

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۵۱۳۸۸۰۴۰۵۱، نمابر: ۰۵۱۳۸۷۶۶۴۱۶، پست الکترونیکی: Karimpur@um.ac.ir

[DOI: 10.29252/ijcm.26.2.369]



شکل ۱ جایگاه ساختاری و راه‌های دسترسی به منطقه اکتشافی شاه سلطان علی (جنوب بیرجند، خراسان جنوبی).

حوضه اقیانوسی در شرق ایران، ۸۶ میلیون سال پیش بسته شده است. به همین سبب فعالیت ماگمایی ائوسن – الیگوسن در پهنه لوت و سیستان، پس از برخورد بوده و علت آن، فرآیندهای لایه لایه شدن پس از برخورد بیان شده است.

از آنجاکه تاکنون واحدهای آتشفشانی منطقه شاه سلطان علی از نظر سنگ‌شناسی بررسی نشده است، در این پژوهش سنگ نگاری، ویژگی زمین‌شیمیایی، سنگ‌زایی و محیط زمین- ساختی این واحدها به دقت بررسی می‌شود.

زمین‌شناسی منطقه

واحدهای آتشفشانی شاه سلطان علی در نیمه شمالی منطقه اکتشافی با همین نام رخنمون یافته‌اند. وسعت تقریبی این واحدها حدود ۸ کیلومتر مربع است و بیشتر به صورت تپه‌های نه چندان مرتفع دیده می‌شوند. عوامل فیزیکی و شیمیایی، بر سنگ‌های آتشفشانی اثر گذاشته و سبب ایجاد ریخت‌شناسی تپه ماهوری با رنگ‌های سیاه تا سبز تیره شده است. البته در قسمت‌هایی برشی شدن شدید در واحدهای آتشفشانی دیده می‌شود که می‌تواند به دلیل عواملی همچون سرد شدن سریع ماگما و زمین‌ساخت منطقه (به ویژه فعالیت گسل‌هایی با روند شمال غربی- جنوب شرقی) باشد. براساس نقشه زمین‌شناسی ورقه سرچاه شور در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ [۱]، این واحدها بیشتر آندزیت و داسیت‌های دگرسان شده ائوسن تا الیگوسن نامگذاری شده‌اند که همراه آنها گنبدهای پیروکسن آندزیتی منفرد با سن نوزا دیده می‌شود [۱]. اما بررسی‌های دقیق زمین صحرایی و آزمایشگاهی نشان داد که واحدهای سنگی با عنوان داسیت‌های دگرسان شده در نقشه زمین‌شناسی ورقه سرچاه شور، بیشتر توده‌های نفوذی نیمه عمیق با ترکیب دیوریت پورفیری، مونزونیت پورفیری و مونزودیوریت پورفیری به شدت دگرسان شده هستند که به اشتباه داسیت‌های دگرسان شده نامگذاری شده‌اند. در این نقشه اشاره‌ای به واحدهای بازالتی نیز نشده است. بررسی‌های صحرایی نشان می‌دهد که واحد پیروکسن بازالت از نظر سن نسبی قدیمی‌ترین واحد سنگی در منطقه شاه سلطان علی است و پس از آن واحدهای آندزیتی تشکیل شده‌اند. در مرحله بعدی، توده‌های نیمه عمیق در این واحدها نفوذ کرده‌اند. در اطراف منطقه شاه سلطان علی، چندین کانسار مس- طلا پورفیری شناسایی شده‌اند که عبارتند از: کانسار مس- طلا پورفیری ماهرآباد (غرب منطقه مورد بررسی) در ۷۰ کیلومتری جنوب غربی بیرجند [۷]، مس - طلا پورفیری کوه شاه (شرق منطقه مطالعاتی) در ۹۰ کیلومتری جنوب بیرجند [۸] و کانسار مس- طلا پورفیری خوپیک (جنوب منطقه) در ۷۰ کیلومتری جنوب غربی بیرجند [۹]. گفتنی است که در منطقه شاه سلطان علی، کانی‌سازی با

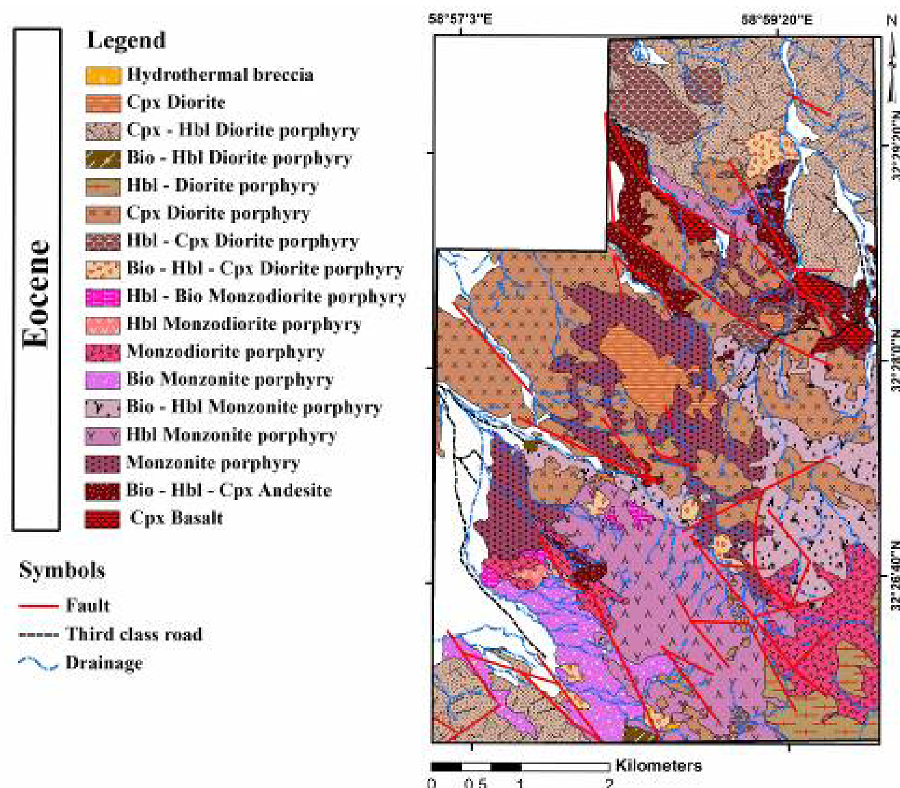
واحدهای نفوذی نیمه عمیق (مونزونیت پورفیری و مونزودیوریت پورفیری) در ارتباط بوده و هیچ گونه کانی‌سازی در واحدهای آتشفشانی و توده‌های نیمه عمیق دیوریت پورفیری رخ نداده است. بررسی‌های سن‌سنجی نشان می‌دهد که واحدهای آندزیتی قدیمی‌تر از واحدهای مونزونیت و مونزودیوریت پورفیری هستند و توده‌های دیوریت پورفیری پس از کانی‌سازی در منطقه نفوذ کرده‌اند و جوان‌ترین واحدهای سنگی منطقه هستند.

روش بررسی

به منظور تهیه نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ از تمام واحدهای سنگی منطقه نمونه‌برداری شد و در مجموع تعداد ۱۶۰ مقطع نازک جهت بررسی‌های دقیق سنگ‌نگاری و دگرسانی از کل منطقه تهیه گردید که از این تعداد، حدود ۴۰ نمونه مربوط به واحدهای آتشفشانی است. برای تعیین عناصر اصلی به منظور بررسی‌های زمین شیمیایی سنگ‌ها، ۱۰ نمونه سنگی با کمترین دگرسانی و هوازدگی برای تجزیه به روش طیف‌سنجی فلئورسانس پرتو x (XRF) به آزمایشگاه آمتیس شرق ارسال شد. این نمونه‌ها پس از خردایش و نرمایش توسط دستگاه فیلیپس مدل PW 1480 تجزیه شدند. همچنین ۹ نمونه برای تعیین عناصر کمیاب و خاکی نادر به آزمایشگاه Acme کانادا ارسال گردید که در این آزمایشگاه نمونه‌ها توسط روش ذوب قلیایی با استفاده از حلال متابورات/ ترابورات و اسید نیتریک آماده سازی شده و سپس توسط روش پلاسمای جفت شده القایی (ICP- MS) با دقت ۰٫۰۱ ppm تجزیه شدند. در نهایت نقشه زمین‌شناسی منطقه به کمک نرم افزار Arc map رسم گردید، همچنین به منظور تفسیر داده‌های زمین‌شیمی و رسم نمودارها از نرم افزارهای GCDkit و CorelDraw استفاده شد.

سنگ‌نگاری

سنگ‌های آتشفشانی علاوه بر مشخصات صحرایی، عموماً با بافت‌های پورفیری، بادامکی و گلومروپورفیری شناخته می‌شوند [۱۰،۱۱]. واحدهای آتشفشانی در منطقه مورد بررسی دارای ترکیب آندزیتی و بازالتی هستند (شکل ۲). براساس روابط و مشاهدات صحرایی، قدیمی‌ترین واحد سنگی منطقه، واحد پیروکسن بازالت است. این واحد به صورت روانه‌های بازالتی در شمال و شمال شرقی منطقه رخنمون دارد، همچنین واحدهای آندزیتی با رخنمون به نسبت بیشتر اغلب در شمال منطقه دیده می‌شود (شکل ۲).



شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی گستره شاه سلطان علی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰.

[DOI: 10.29252/ijcm.26.2.369]

پیروکسن بازالت: اصلی‌ترین رخنمون واحد پیروکسن بازالت در نیمه شمالی و شرقی منطقه است. البته رخنمون کوچکی از این واحد در مرکز منطقه نیز دیده می‌شود (شکل ۲). در مجموع واحد پیروکسن بازالت مساحتی حدود ۲ کیلومتر مربع را اشغال کرده و ریختار سطحی آن به صورت گدازه‌های جریانی و برشی شده است. ساخت این واحد در نمونه دستی پورفیری ریز بلور است. در مقاطع نازک بافت اصلی این واحد پورفیری با زمینه ریزسنگی، شیشه‌ای، گلومروپورفیری و گاهی حفره‌دار (بادامکی) است (شکل‌های ۳ پ و ت). برپایه بررسی‌های صورت گرفته، فراوانی درشت بلور در مقاطع مختلف بین ۳۰٪ تا ۴۰٪ متغیر بوده و عمدتاً درشت بلورهای سنگ بیشتر از دو کانی کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز تشکیل شده‌اند. اندازه این دو کانی بین ۰/۵ تا ۳ میلیمتر متغیر است. زمینه این واحد بیشتر از کانی پلاژیوکلاز با فراوانی ۲۰ درصد و اندازه تقریبی ۰/۲ میلیمتر به همراه ۱۰ درصد کلینوپیروکسن تشکیل شده است و باقی زمینه از شیشه است. بلورهای پلاژیوکلاز در زمینه بیشتر به صورت ریزسنگ‌های سوزنی شکل و به ندرت به صورت تیغک‌های دندریتی هستند. بلورهای پلاژیوکلاز در درشت‌بلورها، فراوانی حدود ۵٪ تا ۱۰٪ دارند و اندازه تقریبی آنها بین ۰/۵ تا ۰/۷ میلیمتر متغیر است. این کانی به میزان ۱۰٪ به سریسیت تجزیه شده است. فراوان‌ترین کانی در بین درشت بلورهای واحد بازالتی، کانی کلینوپیروکسن است. این کانی با ترکیب اوژیت تا دیوپسید ۳۰ درصد درشت بلورها را به خود اختصاص داده است. اندازه بلورهای کلینوپیروکسن بین ۰/۵ تا ۳ میلیمتر متغیر است و بیشتر به صورت بلورهای شکل-دار هشت وجهی با ماکل تیغه‌ای دیده می‌شوند. الیوین‌ها در این واحد بی شکل و دارای کناره گردشده هستند. این کانی بین ۵ تا ۱۰ درصد حجم سنگ را تشکیل می‌دهد و به کانی‌های کلریت، کربنات و اکسید آهن تجزیه شده است. از نظر دگرسانی واحد پیروکسن بازالت دگرسانی ضعیف تا متوسط پروپلیتی را نشان می‌دهد.

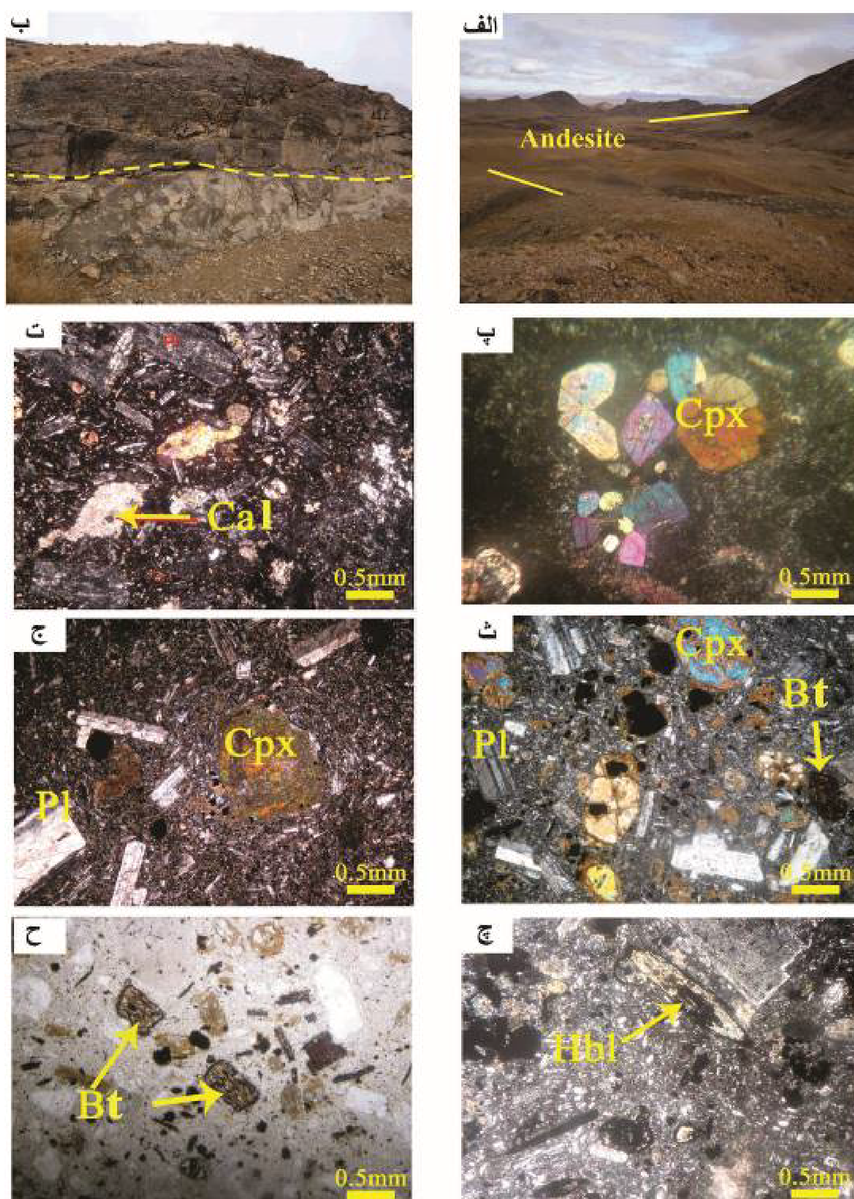
بیوتیت هورنبلند پیروکسن آندزیت: واحدهای آندزیتی در شمال و جنوب غربی منطقه مورد بررسی دیده می‌شوند، اما رخنمون اصلی آنها در شمال و در مجاورت واحد پیروکسن بازالت است (شکل ۲). این واحدها به صورت تپه‌های نه چندان مرتفع برونزد داشته و وسعت آنها ۴ کیلومتر مربع است (شکل-های ۳ الف و ب). در بررسی‌های صحرایی درشت بلورهای شیری رنگ پلاژیوکلاز در زمینه‌ای بسیار ریز بلور و تیره رنگ دیده می‌شود. در مقاطع نازک، بافت اصلی این واحد پورفیری و بافت‌های فرعی آن گلومروپورفیری، جریانی، سری‌آیت و خال خال است. فراوانی درشت‌بلورها در این واحد بین ۴۵٪ تا ۵۰٪ و اندازه آنها بین ۰/۵ تا ۴ میلیمتر متغیر است. زمینه سنگ در این واحد بیشتر از ریزسنگ‌های پلاژیوکلاز تشکیل شده که فراوانی پلاژیوکلازها با اندازه ۰/۲ تا ۰/۳ میلیمتر در زمینه، حدود ۴۰٪ است. این ریزسنگ‌ها در برخی مناطق حالت جریانی و جهت‌یابی به خود گرفته‌اند. مهم‌ترین درشت بلورهای تشکیل دهنده این مجموعه، کانی پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن به همراه مقدار اندکی کانی‌های هورنبلند و بیوتیت است (شکل ۳ ث). فراوانی بلورهای پلاژیوکلاز به صورت درشت بلور، حدود ۳۰٪ است و اغلب به شکل بلورهای قطور مستطیلی با ماکل چند عنصری و برخی با حالت منطقه بندی یافت می‌شوند. براساس زاویه خاموشی ماکل‌ها، بیشتر پلاژیوکلازها از نوع الیگوکلاز تا آندزین بوده و اندازه آنها بین ۰/۷ تا ۴ میلیمتر متغیر است. کلینوپیروکسن در واحد آندزیتی بیشتر از نوع اوژیت و بندرت دیوپسید و دارای فراوانی حدود ۱۲٪ و متوسط اندازه ۱ میلیمتر است (شکل ۳ ج). از دیگر کانی‌های مافیک این واحد می‌توان به هورنبلند و بیوتیت اشاره کرد. این دو کانی اغلب به اکسید آهن تجزیه شده و یا به عبارتی اپاسیتی شده‌اند (شکل‌های ۳ چ و ح). طبق نظر کواباتا و همکارش [۱۲]، در مواردی هر چه ضخامت کناره سوخته در کانی‌های مافیک بیشتر باشد سرعت صعود ماگما کندتر بوده است همچنین گریزندگی بالای اکسیژن در ماگما سبب ایجاد کناره سوخته در برخی کانی‌ها خواهد شد. واحدهای آندزیتی فاقد دگرسانی هستند و یا در قسمت‌هایی دگرسانی پروپلیتی ضعیف را نشان می‌دهند. این دگرسانی اغلب ناشی از تبدیل جزئی پلاژیوکلاز به کربنات و هورنبلند به کلریت، کربنات و اکسید آهن است.

برش‌های آتشفشانی: واحدهای برشی رخنمون کوچکی در مرکز و جنوب منطقه دارند و به همین سبب در نقشه زمین-شناسی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ رسم نشده‌اند. قطعات تشکیل دهنده این برش‌ها از پیروکسن آندزیت و پیروکسن هورنبلند تراکی آندزیت هستند که در زمینه‌ای از جنس آندزیت قرار دارند.

توده‌های نیمه عمیق: واحدهای نفوذی نیمه عمیق در منطقه مورد بررسی به سه گروه اصلی مونزونیت پورفیری، مونزودیوریت پورفیری و دیوریت پورفیری تقسیم می‌شوند. توده‌های مونزونیت پورفیری و مونزودیوریت پورفیری بیشتر در مرکز و جنوب منطقه شاه سلطان علی رخنمون دارند. بافت اصلی این توده‌ها پورفیری با زمینه دانه‌متوسط بوده و درصد

[DOI: 10.29252/ijcm.26.2.369]

درشت بلور آنها بین ۲۰٪ تا ۳۵٪ متغیر است. درشت بلور این توده‌ها از کانی‌های پلاژیوکلاز، ارتوکلاز و کمی کوارتز تشکیل شده است که براساس فراوانی و نوع کانی‌های مافیک، به چندین زیر مجموعه تقسیم می‌شوند و دگرسانی اصلی آنها دگرسانی کوارتز- سریسیت- پیریت است. کانی‌سازی در منطقه تنها با این واحدها همراه شده است. واحدهای دیوریت پورفیری در مرکز و شمال منطقه شاه سلطان علی بیرون‌زدگی دارند. این توده‌ها بافت پورفیری و گلومروپورفیری را نشان می‌دهند. درصد درشت بلور آنها بین ۳۰٪ تا ۴۵٪ متغیر بوده و پلاژیوکلاز اصلی‌ترین کانی این توده‌ها در نظر گرفته می‌شود. واحدهای دیوریت پورفیری از نظر سنی جوان‌تر از سایر واحدها هستند و دگرسانی آنها بیشتر پروپلیتی ضعیف تا متوسط است.



شکل ۳ الف) نمایی از رخنمون نه چندان مرتفع واحدهای آندزیتی. ب) نمایی از عملکرد گسل‌های منطقه و برشی شدن واحدهای آندزیتی بالایی. پ) بافت گلومروپورفیری در واحد پیروکسن بازالت (XPL). ت) بافت بادامکی و پرشدگی حفره‌ها با کلسیت (Cal) در واحد پیروکسن بازالت (XPL). ث) درشت بلورهای کلینوپیروکسن نوع اوژیت به همراه پلاژیوکلاز (Pl) در واحد پیروکسن آندزیت (XPL). ج) درشت بلور درشت از کلینوپیروکسن(Cpx) در حال تجزیه در واحد پیروکسن آندزیت (XPL). چ) نمایی از درشت بلورهای هورنبلند (Hbl) با کناره سوخته و اپاسیتی شده در واحد پیروکسن هورنبلند آندزیت (XPL). ح) درشت بلورهای بیوتیت (Bt) در حال تبدیل به کانی‌های کدر در واحد بیوتیت پیروکسن آندزیت (PPL). (علائم اختصاری برگرفته از مرجع [۱۳] هستند).

[DOI: 10.29252/ijcm.26.2.369]

زمین‌شیمی واحدهای آتشفشانی

از مجموع ۱۶۰ نمونه سنگی برداشت شده از کل منطقه، ۴۰ نمونه مربوط به واحدهای آتشفشانی است که براساس بررسی‌های دقیق سنگ‌نگاری، تعداد ۱۰ نمونه از آنها با کمترین دگرسانی برای تجزیه اکسیدهای اصلی، عناصر خاکی نادر و جزئی انتخاب شد که نتایج حاصل از تجزیه شیمیایی آنها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ نتایج تجزیه شیمیایی اکسیدهای اصلی بر پایه درصد وزنی و عناصر فرعی و کمیاب بر پایه ppm از محدوده شاه سلطان علی (۱= آندزیت، ۲= آندزیت- بازالت).

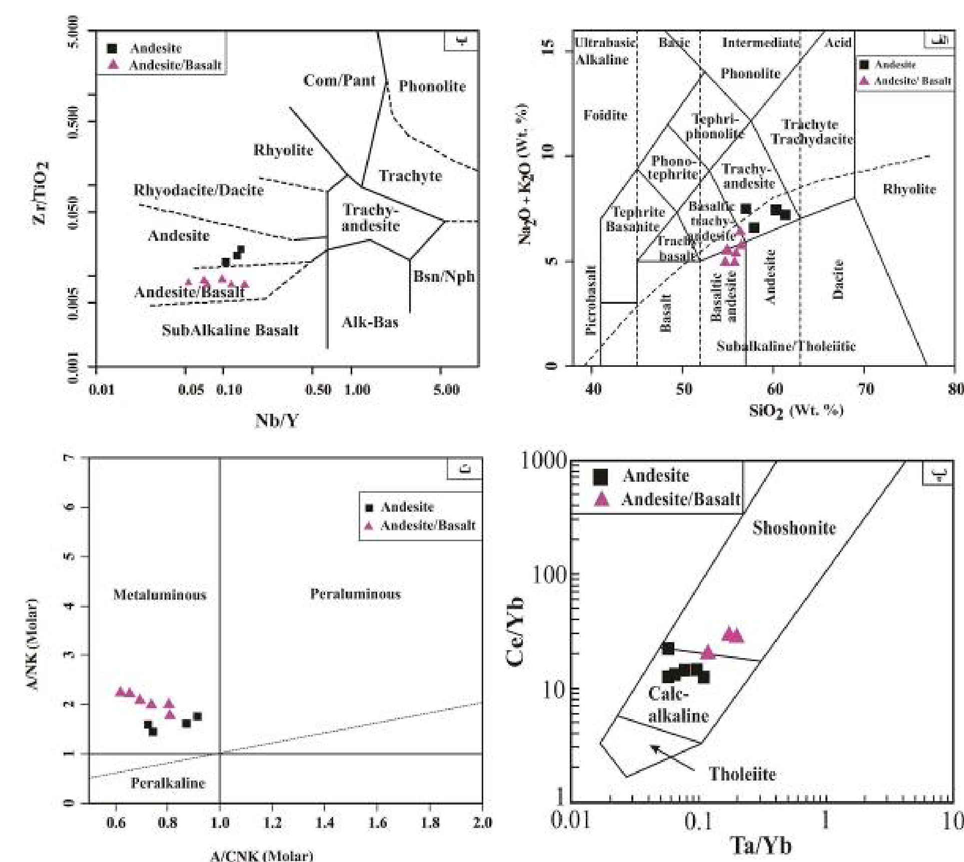
شماره نمونه	N۳۳	N۶۱	N۷۵	N۸۹	N۹۲	N۱۱۱	N۱۱۸	N۱۲۵	N۱۳۶	N۱۶۲
X	۳۲°۲۶′۰۸	۳۲°۲۷′۵۱	۳۲°۲۶′۴۵	۳۲°۲۷′۲۰	۳۲°۲۹′۰۲	۳۲°۲۸′۲۳	۳۲°۲۹′۱۵	۳۲°۲۸′۰۲	۳۲°۲۸′۲۷	۳۲°۲۸′۱۵
Y	۵۸°۵۷′۴۱	۵۸°۵۶′۵۸	۵۸°۵۷′۵۲	۵۸°۵۸′۱۳	۵۸°۵۸′۲۸	۵۸°۵۹′۲۲	۵۸°۵۹′۲۴	۵۸°۵۸′۵۷	۵۸°۵۹′۲۷	۵۸°۵۹′۳۰
سنگ	۱	۱	۱	۱	۲	۱	۱	۱	۲	۲
SiO_2	۵۹٫۳۳	۵۳٫۵	۵۵٫۲۴	۵۵٫۵۹	۵۳٫۵۶	۵۴٫۵۹	۵۸٫۵۶	۵۳٫۰۸	۵۳٫۰۲	۵۴٫۱۱
Al_2O_3	۱۶٫۱۴	۱۶٫۱۰	۱۵٫۹۱	۱۵٫۴۷	۱۴٫۳	۱۵٫۰۵	۱۴٫۲۹	۱۵٫۴۱	۱۴٫۵۳	۱۵٫۰۲
TFeO	۵٫۷۱	۷٫۹۰	۸٫۰۹	۷٫۱۵	۹٫۱۸	۸٫۸۳	۵٫۴۶	۸٫۶۸	۸٫۲۶	۸٫۴۰
MgO	۳٫۴۸	۳٫۹۰	۴٫۲۲	۵٫۸۱	۵٫۴۸	۵٫۱۴	۳٫۲۸	۵٫۶۲	۵٫۴۰	۴٫۲۲
CaO	۴٫۸۲	۶٫۳۰	۷٫۴۰	۴٫۴۷	۷٫۴۹	۵٫۶۰	۵٫۷۴	۶٫۱۳	۹٫۱۸	۸٫۹۶
Na_2O	۳٫۴۰	۴٫۰۱	۲٫۸۵	۳٫۲۵	۲٫۴۱	۲٫۸۴	۲٫۸۸	۲٫۳۸	۲٫۱۲	۲٫۱۴
K_2O	۳٫۹۰	۳٫۶۰	۳٫۱۲	۳٫۱۶	۲٫۷۴	۳٫۴۳	۴٫۱۱	۳٫۶۱	۲٫۷۹	۳٫۰۵
TiO_2	۰٫۶۱	۰٫۷۱	۰٫۷۲	۰٫۶۱	۰٫۷۶	۰٫۷۵	۰٫۵۷	۰٫۷۵	۰٫۷۰	۰٫۷۳
P_2O_5	۰٫۴۲	۰٫۵۳	۰٫۳۱	۰٫۲۶	۰٫۴۴	۰٫۳۰	۰٫۲۹	٫۳۰	۰٫۲۵	۰٫۲۶
MnO	۰٫۰۸	۰٫۱۴	۰٫۱۰	۰٫۱۵	۰٫۱۲	۰٫۱۰	۰٫۱۱	۰٫۲۸	۰٫۱۲	۰٫۱۳
افت (L.O.I)	۱٫۸۳	۳٫۱۰	۱٫۸۲	۳٫۸۶	۳٫۰۲	۳٫۱۷	۴٫۴۸	۳٫۵۱	۳٫۰۹	۲٫۵۰
مجموع	۹۹٫۷۲	۹۹٫۷۹	۹۹٫۷۸	۹۹٫۷۸	۹۸٫۸۰	۹۹٫۸۰	۹۹٫۷۷	۹۹٫۷۵	۹۹٫۶۴	۹۹٫۵۲
Ba	۸۰۹	-	۶۰۰	۷۸۲	۵۶۱	۷۰۹	۶۸۴	۱۱۳۹	۶۰۵	۶۷۰
Cs	۲٫۸۰	-	۳٫۸۰	۲٫۸۰	۰٫۹۰	۱۴٫۱۰	۸٫۱۰	۲	۱٫۶۰	۰٫۶۰
Hf	۳٫۱۰	-	۱٫۸۰	۲٫۳۰	۱٫۸۰	۱٫۷۰	۲٫۸۰	۱٫۹۰	۱٫۹۰	۱٫۷۰
Nb	۴٫۸۰	-	۱٫۷۰	۳٫۱۰	۲٫۲۰	۲٫۵۰	۴٫۹۰	۲٫۵۰	۱٫۷۰	۱٫۹۰
Rb	۹۳٫۴۰	-	۶۸	۶۴٫۱۰	۳۵٫۹۰	۷۲٫۹۰	۱۰۱٫۶۰	۵۴٫۲۰	۵۰٫۶۰	۵۰٫۲۰
Sr	۹۹۶٫۶	-	۶۸۳٫۴۰	۸۵۶٫۶۰	۷۶۴٫۹۰	۶۵۲٫۹۰	۷۸۶	۶۷۱٫۲۰	۱۸۰۹٫۹۰	۷۰۱٫۸
Ta	۰٫۴۰	-	۰٫۱۰	۰٫۲۰	۰٫۲۰	۰٫۱۰	۰٫۴۰	۰٫۲۰	۰٫۱۰	۰٫۱۰
Zr	۱۰۵٫۳۰	-	۶۰٫۳۰	۸۴٫۲۰	۶۲٫۱۰	۶۰٫۷۰	۱۰۳٫۸۰	۷۰٫۵	۶۰٫۹	۵۹٫۳۰
Y	۳۸	-	۳۲	۲۹	۱۹٫۳۰	۱۷٫۵	۳۹	۲۵	۲۴	۲۶
La	۲۶٫۴۰	-	۱۵٫۹۰	۲۰٫۱۰	۱۶٫۹۰	۱۴٫۵	۲۴٫۱	۱۴٫۱	۱۳٫۳	۱۴٫۴
Ce	۵۲٫۵۰	-	۴۳٫۱۰	۴۰٫۲۰	۳۵٫۵۰	۲۸٫۴	۴۵٫۲	۲۵٫۸	۲۳٫۱	۲۶٫۵
Pr	۶٫۱۰	-	۴٫۰۴	۵٫۰۹	۴٫۷۰	۳٫۸۰	۵٫۴۵	۳٫۴۵	۳٫۲۱	۳٫۵۵
Nd	۲۴٫۲۰	-	۱۷٫۹۰	۲۱٫۹۰	۲۰٫۲۰	۱۶٫۵۰	۲۱٫۶۰	۱۴٫۵۰	۱۳٫۸۰	۱۵٫۷۰
Sm	۵	-	۳٫۹۵	۴٫۸۴	۴٫۳۶	۳٫۵۴	۴٫۳۸	۳٫۱۹	۳٫۱۹	۳٫۶۲
Eu	۱٫۳۳	-	۱٫۱۳	۱٫۱۶	۱٫۱۹	۱٫۰۷	۱٫۱۲	۱٫۰۲	۰٫۹۱	۰٫۹۹
Gd	۴٫۲۲	-	۳٫۶۰	۴٫۰۳	۳٫۹۴	۳٫۵۳	۳٫۷۵	۳٫۴۱	۳٫۱۱	۳٫۲۷
Tb	۰٫۵۶	-	۰٫۵۴	۰٫۵۸	۰٫۶۰	۰٫۵۳	۰٫۴۷	۰٫۵۳	۰٫۴۷	۳٫۵۲
Dy	۳٫۳۴	-	۳٫۱۶	۳٫۷۴	۳٫۵۰	۳٫۳۱	۲٫۹۱	۲٫۹۷	۲٫۸۳	۳٫۱۷
Ho	۰٫۶۲	-	۰٫۶۰	۰٫۷۴	۰٫۷۱	۰٫۶۶	۰٫۵۳	۰٫۶۸	۰٫۵۸	۰٫۷۰
Er	۱٫۹۰	-	۲٫۰۸	۲٫۱۳	۲٫۱۵	۲٫۰۰	۱٫۶۸	۱٫۹۶	۱٫۸۴	۱٫۸۶
Tm	۰٫۳۰	-	۰٫۲۷	۰٫۳۰	۰٫۳۲	۰٫۳۱	۰٫۲۱	۰٫۲۹	۰٫۲۶	۰٫۲۷
Yb	۱٫۸۶	-	۲٫۰۳	۲٫۰۸	۲٫۰۹	۱٫۹۵	۱٫۵۹	۱٫۸۸	۱٫۸۳	۱٫۹۶
Th	۸٫۵۰	-	۳٫۹۰	۶	۱٫۸۰	۱٫۷۰	۸٫۴۰	۳٫۳۰	۳٫۱۰	۲٫۹۰
Lu	۰٫۳۱	-	۰٫۲۹	۰٫۳۱	۰٫۳۱	۰٫۲۹	۰٫۲۶	۰٫۲۸	۰٫۲۹	۰٫۳۱
نسبت ها										
Ba/La	۳۰٫۶۰	-	۳۷٫۷۰	۳۸٫۹۰	۳۳٫۱۰	۴۸٫۸۰	۲۸٫۳۰	۸۰٫۷۰	۴۵٫۴۰	۴۶٫۵۰
Eu/Eu*	۰٫۸۹	-	۰٫۹۲	۰٫۸۰	۰٫۸۸	۰٫۹۳	۰٫۸۴	۰٫۹۵	۰٫۸۸	۰٫۸۸
La/Yb_N	۹٫۵۷	-	۵٫۲۸	۶٫۵۲	۵٫۴۵	۵٫۰۱	۱۰٫۲۲	۵٫۰۶	۴٫۹۰	۴٫۹۵

[DOI: 10.29252/ijcm.26.2.369]

عناصر اصلی

در اینجا، از عناصر اصلی، کمیاب و خاکی نادر برای نام‌گذاری واحدهای سنگی، تعیین ماهیت و سری ماگمایی استفاده شده است. در این سنگ‌ها مقدار SiO_2 بین ۵۳٫۰۸ تا ۵۹٫۳۳ درصد وزنی و مجموع K_2O+Na_2O در آن‌ها بین ۴٫۹۱ تا ۷٫۶ درصد وزنی متغیر است. رده‌بندی واحدهای آتشفشانی بر پایه نسبت اکسیدهای اصلی براساس نمودار SiO_2 نسبت به (K_2O+Na_2O) [۱۴]، نشان می‌دهد که واحدهای آتشفشانی منطقه در دو گروه آندزیت بازالت و تراکی آندزیت جای می‌گیرند (شکل ۴ الف)، لذا با توجه به اینکه عناصر کمیاب و فرعی کمتر دستخوش فرآیندهای دگرسانی و هوازدگی می‌شوند، برای نامگذاری دقیق‌تر واحدهای سنگی از نمودار Nb/Y نسبت به Zr/TiO_2 [۱۵]، استفاده شده است. براساس این نمودار، همه واحدهای آتشفشانی منطقه به دو گروه آندزیت و آندزیت بازالت تقسیم می‌شوند (شکل ۴ ت). این نتایج با بررسی‌های صحرایی همخوانی قابل قبولی دارد.

در نمونه‌های تجزیه شده، نسبت Ce/Yb و Ta/Yb در واحدهای آتشفشانی به ترتیب بین ۱۳٫۵۲ تا ۲۸٫۴۸ و ۰٫۰۴ تا ۰٫۱ متغیر است. در نمودار Ce/Yb نسبت به Ta/Yb [۱۶]، بیشتر نمونه‌های آندزیتی در گستره آهکی-قلیایی پتاسیم بالا قرار گرفته است و نمونه‌های آندزیت-بازالت ماهیت سری شوشونیتی را نشان می‌دهند (شکل ۴ پ). پژوهش‌های پیشین در پهنه لوت [۲-۵-۸-۹] نشان می‌دهد که ماگمای تشکیل دهنده واحدهای سنگی در پهنه لوت از مقدار K_2O بالایی برخوردار است و یا به عبارتی ماهیت ماگمایی آنها بیشتر در گستره آهکی-قلیایی پتاسیم بالا قرار دارد و این ویژگی از مشخصه‌های بارز فعالیت ماگمایی در پهنه لوت است. بر اساس نمودار $Al_2O_3/(Na_2O + K_2O)$ نسبت به $Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)$ [۱۷]، واحدهای سنگی نام برده در گستره متا آلومین قرار دارند (شکل ۴ ت).



شکل ۴ الف) نامگذاری واحدهای آتشفشانی به روش مجموع قلیا-سلیس (TAS) براساس درصد اکسیدهای اصلی SiO_2 نسبت به مجموع Na_2O+K_2O [۱۴]. ب) رده بندی واحدهای آتشفشانی منطقه شاه سلطان علی بر اساس نمودار Zr/TiO_2 نسبت به Nb/Y [۱۵]. پ) تعیین سری ماگمایی نمونه‌های تجزیه شده از منطقه شاه سلطان علی براساس نمودار Ta/Yb نسبت به Ce/Yb [۱۶]. ت) نمودار A/NK نسبت به A/CNK برای سنگ‌های آتشفشانی منطقه شاه سلطان علی [۱۷].

[DOI: 10.29252/ijcm.26.2.369]

عناصر فرعی و خاکی نادر

در نمودار بهنجار شده نسبت به کندریت [۱۸]، غنی‌شدگی متوسطی از عناصر خاکی نادر سبک (LREE) نسبت به خاکی نادر سنگین (HREE) دیده می‌شود (شکل ۵)، که این غنی-شدگی عناصر LREE در واحدهای آندزیتی به نسبت بیشتر از واحدهای آندزیت بازالتی است. غنی‌شدگی بیشتر عناصر LREE در واحدهای آندزیتی با بالاتر بودن نسبت $(La/Yb)_N$ بین ۶٫۵۲ تا ۱۰٫۲۲ و نسبت $(Ce/Yb)_N$ بین ۴٫۹۲ تا ۷٫۲۳ در مقایسه با واحدهای آندزیت بازالتی به ترتیب با مقادیر ۴٫۹۵ تا ۵٫۴۵ و ۳٫۲۱ تا ۵٫۴۰ نیز تأیید می‌شود. غنی‌شدگی از عناصر LREE نسبت به HREE یکی از مشخصه‌های ماگماهای وابسته به پهنه فرورانش است [۱۹-۲۲]. در الگوی چند عنصره سنگ‌های منطقه شاه سلطان علی بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه [۲۳]، غنی‌شدگی از عناصر سنگ دوست بزرگ یون (LILE) مانند Sr، Ba، K و Cs در مقابل عناصر با پتانسیل یونی بالا، HFSE، (Ti - Nb و Zr) بارز است. این غنی‌شدگی از عناصر LILE به دخالت صفحه فرورونده و آغشتگی جزئی ماگما با پوسته قاره‌ای نسبت داده شده است [۲۴]. همچنین در هر دو گروه سنگی، الگوی عناصر کمیاب و فرعی از روند تقریبا مشابهی پیروی می‌کند و همپوشی را نشان می‌دهد. این موضوع نشان می‌دهد که هر دو نوع گدازه یک خاستگاه مشترک دارند [۲۵] و یا اینکه آندزیت‌ها از جدایش بلورین بازالت‌ها به وجود آمده‌اند [۲۶].

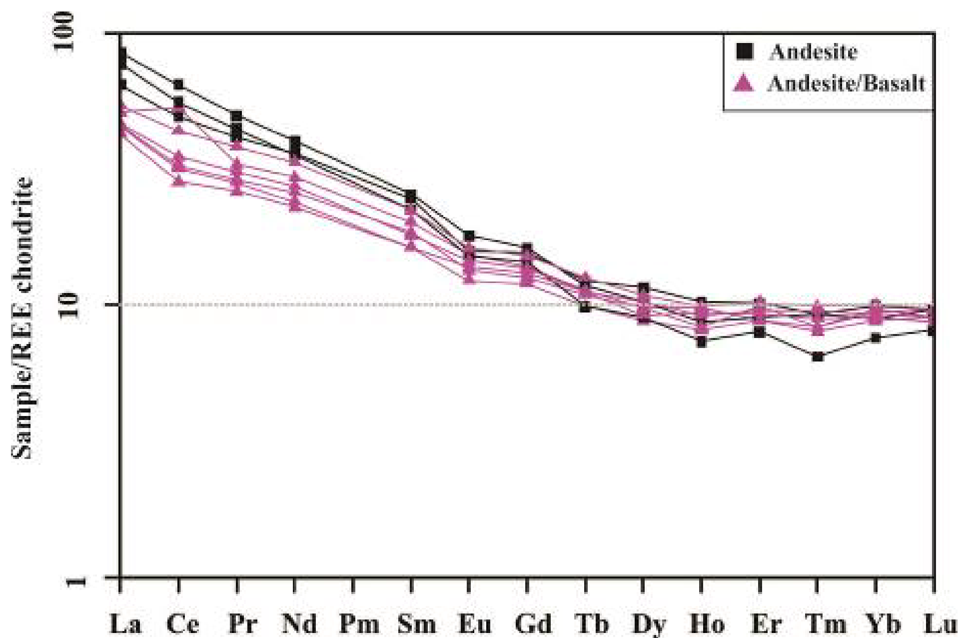
بحث و بررسی

در نمودار بهنجار شده نسبت به کندریت [۱۸]، مقدار کم $(La/Yb)_N$ در همه نمونه‌ها به همراه الگوی عناصر خاکی نادر نشان دهنده تشکیل ماگما در عمق کمتر از گستره پایداری گارنت و یا کم بودن این مقدار در خاستگاه است (جدول ۱). با استفاده از نسبت $(Ce/Yb)_N$ می‌توان تا حدی عمق و نرخ ذوب سنگ مولد را تشخیص داد. کم بودن این مقدار بیانگر خاستگاه ماگما در عمق کم یا نرخ ذوب زیاد است با توجه به اینکه این نسبت در همه واحدهای آتشفشانی پایین‌تر از ۷٫۲۳ است، خاستگاه ماگما در قسمت‌های بالایی گوشته است.

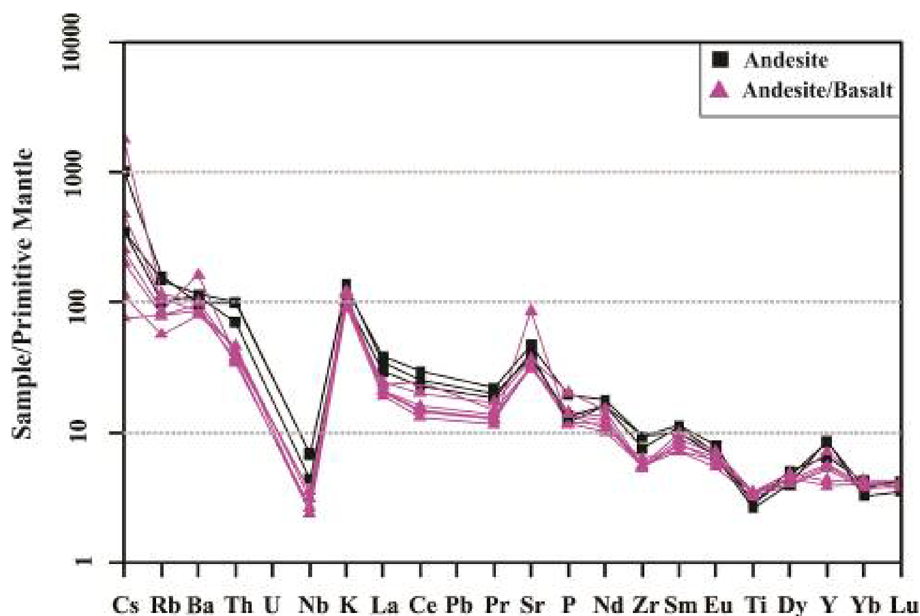
مقدار Eu/Eu^* در واحدهای آتشفشانی بین ۰٫۸۰ تا ۰٫۹۵ متغیر است. این مقدار نشان دهنده ناهنجاری منفی جزئی در سنگ‌های منطقه است (شکل ۵). وجود ناهنجاری منفی Eu از ویژگی‌های گدازه‌های آهکی-قلیایی وابسته به فروانش بوده و بیانگر حضور جزئی پلاژیوکلاز به عنوان فاز باقی مانده طی ذوب‌بخشی است [۲۷]. چنان که گفته شد در نمودار بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه [۲۳]، شاهد غنی‌شدگی از عناصر LILE نسبت به HFSE هستیم. عناصرLILE مانند Sr, Ba و K تحرک بالایی در سیال‌های آبی از خاستگاه پوسته اقیانوسی فرورو دارند و ورود آنها به گوشته نیز این ناهنجاری مثبت را ایجاد می‌کند (شکل ۶) [۲۹،۲۸]. در نمودارهای عنکبوتی بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه، عناصر Sr و Y ناهنجاری مثبت نشان می‌دهند (شکل ۶). Sr عنصری سازگار در کانی پلاژیوکلاز است، بطوریکه ذوب و ناپایدار شدن پلاژیوکلاز باعث آزادسازی Sr و ایجاد ناهنجاری مثبت می‌شود، از طرفی عنصر Y به شدت در کانی گارنت سازگار بوده و غنی‌شدگی از این عنصر نشانه وجود مقداری گارنت در سنگ خاستگاه و ناپایدار شدن آن است. در نمونه‌های مورد بررسی، نسبت Sr/Y بین ۲۰٫۱۵ تا ۳۹٫۶۳ متغیر است. این نسبت به وسیله فراوانی کانی‌های پلاژیوکلاز، گارنت و آمفیبول در فاز باقی مانده توضیح داده می‌شود، به طوریکه مقادیر کمی از پلاژیوکلاز و آمفیبول به همراه مقدار بالاتری از گارنت در فاز باقی مانده سبب ایجاد نسبت بالای Sr/Y در گدازه خواهد شد، که این مقدار به نسبت بالا، بیانگر حضور جزئی گارنت در باقی مانده بوده و توجیه کننده ناهنجاری مثبت Sr و ناهنجاری منفی جزئی Eu است. در نمودار بهنجار شده به گوشته اولیه، عناصر Ti - Nb و Zr ناهنجاری منفی نشان می‌دهند (شکل ۶). عناصر نام برده دارای پتانسیل یونی بالا بوده و در نتیجه در سیال آزاد شده از سنگ کره فرورو نامحلول هستند و ناهنجاری منفی نشان می‌دهند. این ناهنجاری منفی عناصر Ti و Zr ناشی از باقی ماندن این عناصر در ساختار کانی‌هایی مانند تیتانومنیتیت، ایلمنیت و زیرکن است. کانی‌های تیتان‌دار اگر در ماگمای مولد در مخزن باقی مانده باشند، ناهنجاری منفی از Ti را ایجاد می‌کنند [۲۰]. در پهنه‌های فروانش، گریزندگی O_2 بالا است و در گریزندگی بالای O_2 دمای زیادی برای ذوب کانی‌های Ti دار نیاز است و بدلیل فراهم نشدن شرایط ویژه دمایی این عنصر در فازهای تیتان‌دار باقی مانده و ناهنجاری منفی نشان می‌دهد [۳۰]. گفتنی است که آندزیت‌های منطقه

[DOI: 10.29252/ijcm.26.2.369]

در بیشتر عناصر نسبت به سنگ‌های آندزیت بازالتی غنی‌شدگی نشان می‌دهند، در حالی که عنصر Ti در نمونه‌های آندزیتی ناهنجاری منفی‌تری نشان می‌دهد که این ویژگی می‌تواند مربوط به جدایش بیشتر در نمونه‌های آندزیتی باشد. افزایش شیب الگوی عناصر کمیاب در نمونه‌های آندزیتی نسبت به آندزیت- بازالتی، نیز جدایش ماگمای آندزیتی را تأیید می‌کند [۲۸]. ناهنجاری منفی Nb شاخص مناطق فرورانش بوده و کاهیدگی آن از ویژگی‌های نوعی ماگماهای مشتق شده از پوسته اقیانوسی در پهنه فرورانش است [۱۹، ۳۱، ۳۲]. مقادیر منفی Nb و Ta همچنین می‌تواند ناشی از رخداد تهی‌شدگی پیشین در سنگ مخزن گوشته باشد [۳۳، ۳۴].



شکل ۵ نمودار عناصر خاکی نادر بهنجار شده نسبت به کندریت برای واحدهای آتشفشانی منطقه شاه سلطان علی [۱۸].

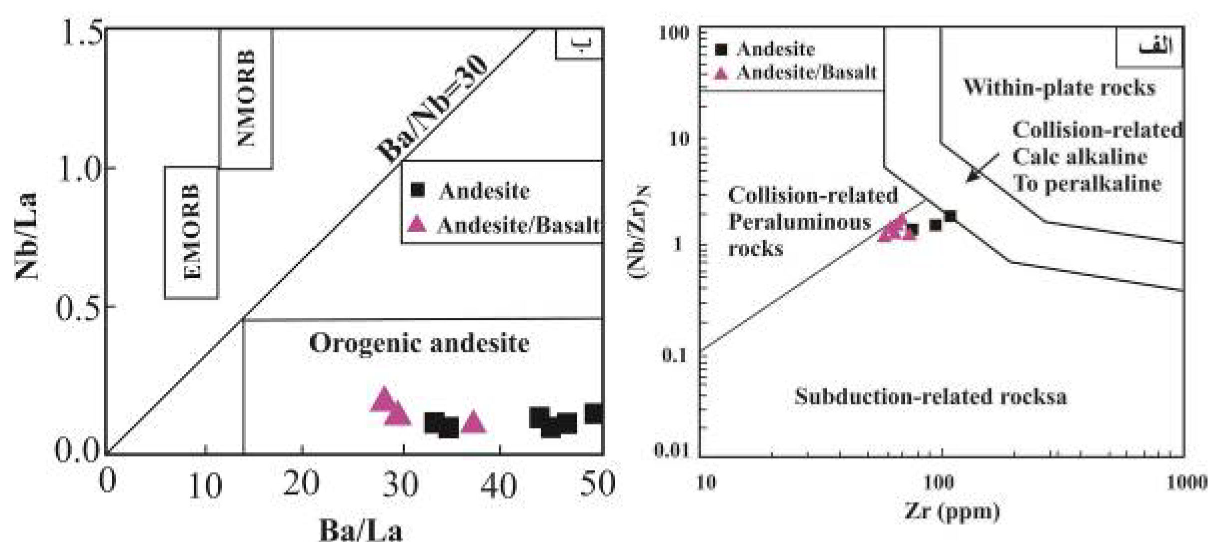


شکل ۶ نمودار فراوانی عناصر جزئی و کمیاب بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه [۲۳].

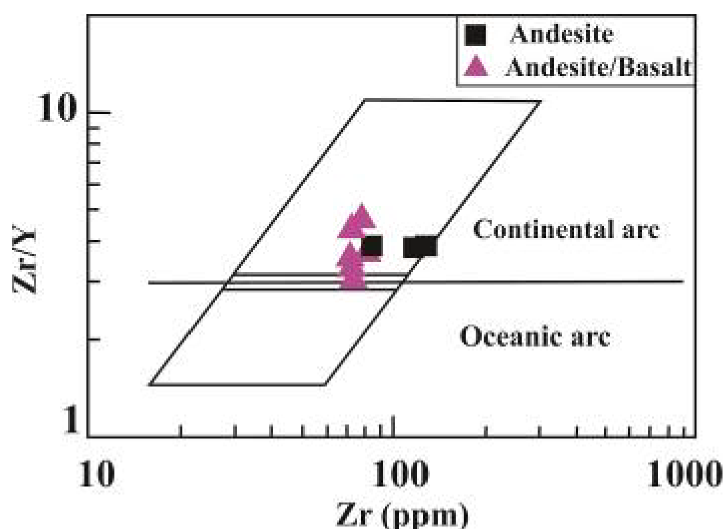
[DOI: 10.29252/ijcm.26.2.369]

محیط زمین ساختی

بر اساس شواهد بسیار از جمله ناهنجاری منفی Nb، غنی‌شدگی از عناصر LILE نسبت به HFSE و قرارگیری منطقه در منطقه ساختاری پهنه لوت، مشخص شده است که آندزیت- بازالت و آندزیت‌های منطقه شاه سلطان علی در محیط‌های وابسته به پهنه فرورانش شکل گرفته‌اند. این ارتباط با پهنه فرورانش در نمودار $(Nb/Zr)_N$ نسبت به Zr نشان داده شده است [۳۵] (شکل ۷ الف). در نمودار Nb/La نسبت به Ba/La [۳۷،۳۶]، واحدهای آتشفشانی منطقه در گستره آندزیت‌های کوهزایی واقع می‌شوند که این قلمرو با کرانه قاره‌ای فعال در ارتباط است (شکل ۷ ب). جهت تعیین نوع کمان آتشفشانی از نمودار Zr/Y نسبت به Zr [۳۸] استفاده شد. براساس این نمودار، همه واحدهای سنگی در قسمت کمان‌های قاره‌ای جانمایی می‌شوند (شکل ۸). کمان‌های قاره‌ای نسبت به کمان‌های اقیانوسی از SiO_2 غنی‌تر هستند و ناهنجاری مثبت‌تری از عناصر K، Rb و U نشان می‌دهند [۳۹]، که این شرایط بر واحدهای آتشفشانی منطقه شاه سلطان علی حاکم است و با کمان‌های قاره‌ای همخوانی دارند.



شکل ۷ الف) نمودار تعیین جایگاه زمین ساختی براساس $(Nb/Zr)_N$ نسبت به Zr (برحسب PPm) [۳۵]. ب) نمودار Nb/La نسبت به Ba/La [۳۷،۳۶].

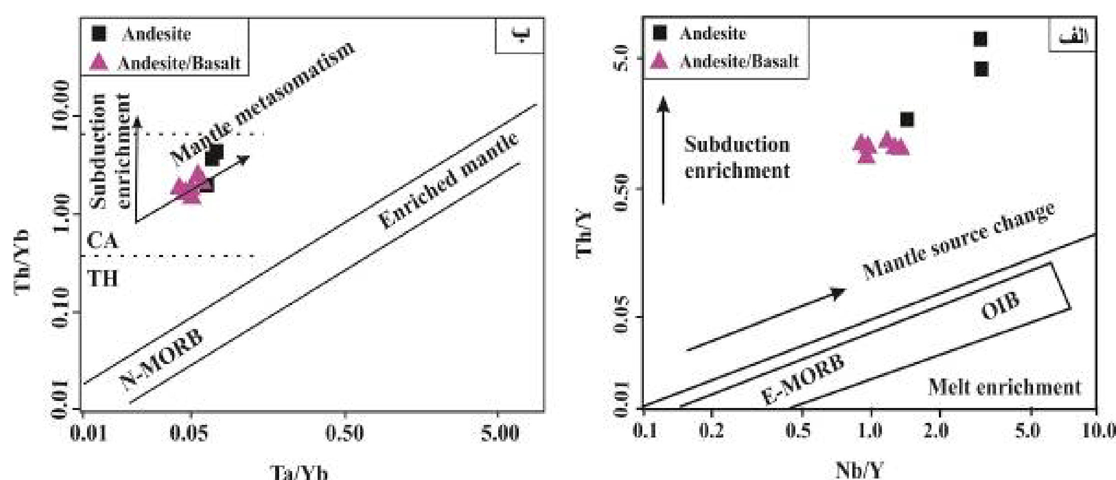


شکل ۸ تعیین نوع کمان آتشفشانی براساس نمودار Zr/Y نسبت به Zr [۳۸].

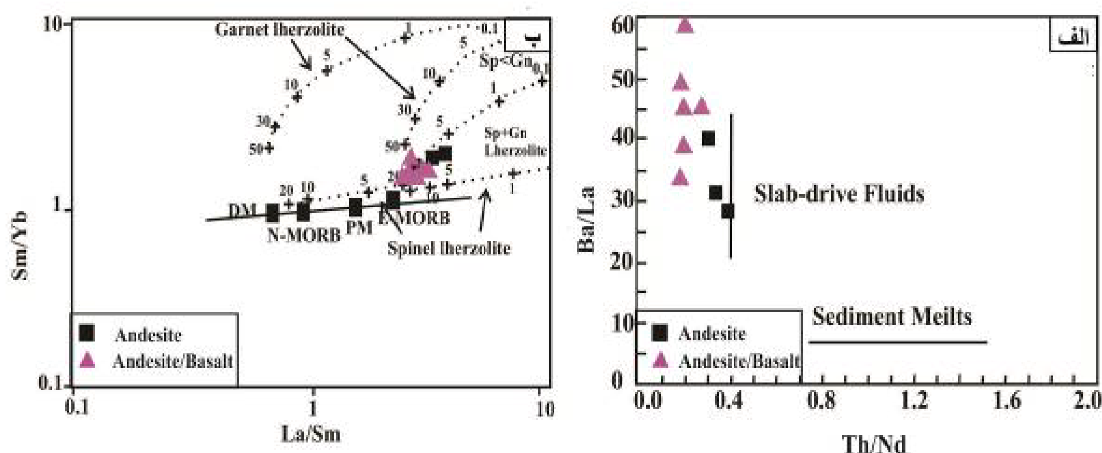
[DOI: 10.29252/ijcm.26.2.369]

خاستگاه

خاستگاه ماگمای تشکیل دهنده آندزیت و بازالت‌های منطقه شاه سلطان علی بر اساس نمودار Th/Y نسبت به Nb/Y [۳۸]، در فاصله بین گوشته تغییر یافته و گوشته غنی شده فرورانش است (شکل ۹ الف). این ماگما براساس نمودار Ta/Yb نسبت به Th/Yb [۳۸]، خاستگاه گوشته دگرنهاد شده را نشان می‌دهد (شکل ۹ ب). جهت تعیین نقش سیال‌های برآمده از فرورانش و دگرنهادی وابسته به رسوبات فرورونده در ماگمای به وجود آورنده سنگ‌های منطقه از نمودار دوتایی Ba/La نسبت به Th/Nd استفاده شد (شکل ۱۰ الف) [۴۰]. برپایه پژوهش وود [۴۱]، نسبت Ba/La برای بازالت های پشته میان اقیانوسی نوع مورب غنی شده (E-MORB) برابر با ۱۰ تا ۱۵، برای نوع تهی شده (N-MORB) حدود ۴ تا ۱۰ و برای مرزهای واگرا بیش از ۱۵ است. این نسبت در سنگ‌های منطقه شاه سلطان علی بین ۲۸٫۳۸ تا ۸۰٫۷۸ متغیر بوده که این مقدار بالا نشانه غنی‌شدگی گوشته به وسیله سیال‌های برآمده از فرورانش است (شکل ۱۰ الف).



شکل ۹ الف) جایگاه سنگ‌های منطقه شاه سلطان علی در نمودار Th/Y نسبت به Nb/Y (بر حسب ppm)[۳۸]. ب) تعیین خاستگاه ماگما و ماهیت سنگ‌های آتشفشانی منطقه شاه سلطان علی بر اساس نمودار Th/Yb نسبت به Ta/Yb (برحسب ppm) [۳۸] (گستره آهکی-قلیایی) بر گرفته از مرجع [۴۰].



شکل ۱۰ الف) موقعیت واحدهای آتشفشانی منطقه در نمودار Ba/La نسبت به Th/Nd (برحسب ppm) ب) نمودار Sm/Yb نسبت به La/Sm برای توده‌های نفوذی منطقه شاه سلطان علی [۴۳]. روند گوشته‌ای در این شکل (خط ضخیم) توسط ترکیب گوشته تهی شده نوع مورب (DM) [۷] و گوشته اولیه (PM) [۲۳] مشخص می‌شود. منحنی‌های ذوب‌بخشی برای خاستگاه گوشته‌ای اسپینل لرزولیت ($Ol_{53}+Opx_{27}+Cpx_{17}+Sp_{11}$) و گارنت لرزولیت ($Ol_{60}+Opx_{20}+Cpx_{10}+gt_{10}$) با ترکیبات گوشته تهی‌شده نوع مورب و گوشته اولیه [۴۲]. خطوط و اعداد روی منحنی‌های ذوب نشان‌دهنده درجه ذوب‌بخشی برای یک خاستگاه گوشته‌ای است.

[DOI: 10.29252/ijcm.26.2.369]

برای بررسی درجه ذوب بخشی و نوع کانی باقی مانده در خاستگاه از نمودار Sm/Yb نسبت به La/Sm استفاده شد [۴۳،۴۲] (شکل ۱۰ ب). در واقع این نمودار به نوعی نمودار MREE/HREE نسبت به LREE/MREE و بیانگر ذوب گارنت لرزولیت یا اسپینل لرزولیت در خاستگاه گدازه است. در این نمودار با افزایش درجه ذوب‌بخشی از مقدار La/Sm کاسته می‌شود و شیب نزولی را نشان می‌دهد. ماگمای مولد واحدهای آندزیتی و بازالتی در گستره شاه سلطان علی بین اسپینل لرزولیت و اسپینل گارنت لرزولیت جای گرفته است. نسبت پایین $(La/Yb)_N$ (۴/۹۰ تا ۱۰/۵۹)، الگوی عناصر کمیاب بهنجار شده نسبت به کندریت، نسبت کم $(Ce/Yb)_N$ (۳/۴۴ تا ۷/۲۳) بهمراه مقدار Yb<۲ بیانگر حضور جزئی گارنت در خاستگاه است. بنابراین نمودارهای زمین‌شیمیایی ماگمای مولد سنگ‌های آتشفشانی منطقه عمق پایداری اسپینل گارنت لروزلیت با مقدار اسپینل بیشتر از گارنت را نشان می‌دهند. درجه ذوب سنگ‌های آندزیتی بین ۵ تا ۱۰ درصد ذوب بخشی بوده و خاستگاه سنگ‌های بازالتی بیشتر از اسپینل گارنت لرزولیت با درجه ذوب بین ۱۰ تا ۲۰ درصد ذوب بخشی است.

برداشت

در این پژوهش مشخص شد که سنگ‌های آتشفشانی منطقه شاه سلطان علی شامل دو گروه آندزیت و آندزیت- بازالت هستند. این سنگ‌ها بیشتر دگرسانی پروپلیتی ضعیف تا متوسط دارند. بررسی‌های زمین‌شیمیایی نشان داد که ماهیت ماگمای آنها آهکی-قلیایی پتاسیم بالا تا شوشونیتی بوده و از نظر مقدار آلومینیوم در گروه سنگ‌های متاآلومین جای می‌گیرند. در همه واحدهای سنگی منطقه غنی‌شدگی از عناصر LREE نسبت به HREE دیده می‌شود، به ویژه تهی‌شدگی از HFSE نسبت به عناصر LILE بارز است. جایگاه ساختاری منطقه مورد بررسی، ناهنجاری منفی از Nb، افزایش نسبت Th/Yb و غنی‌شدگی از عناصر LREE نسبت به HREE همگی نشان دهنده ارتباط منطقه با پهنه فرورانش است. افزایش شیب الگوی عناصر کمیاب در آندزیت‌ها نسبت به بازالت‌های منطقه نیز ناشی از جدایش بیشتر ماگمای تشکیل دهنده آنهاست و این موضوع با اپاسیتی شدن کانی‌های بیوتیت و هورنبلند و کندتر بودن نسبی حرکت ماگما نیز تأیید می‌شود. خاستگاه ماگمای مشتق شده در این پهنه گوشته دگرنهاد شده است و عامل دگرنهادی بودن گوشته بیشتر مربوط به سیال‌های برآمده از صفحه فرورونده و تا حدودی رسوبات رویی آنهاست. از آنجاکه عناصر La، Ce، Th و Pr در سیال‌ها تحرک پذیری بالایی ندارند و بیشتر در رسوبات غنی‌شدگی نشان می‌دهند، و با توجه به نمودارهای ترسیم شده می‌توان گفت که از میان اجزای فرورانشی، سیال‌های فرورونده نقش مهم‌تری داشته‌اند. خاستگاه این ماگما از اسپینل گارنت لرزولیت با مقدار بیشتر اسپینل بوده است که این فعالیت ماگمایی در اثر کشش‌های محلی طی همگرایی پهنه افغان به سمت پهنه لوت در دوره ترشیاری رخ داده است. در مجموع می‌توان چنین گفت که ماگمای مولد واحد آتشفشانی منطقه پیامد ذوب بخشی گارنت اسپینل لرزولیت بوده و سیالات برآمده از فرورانش و احتمالا مقدار کمی گدازه‌های برآمده از رسوبات به خاستگاه گوشته‌ای افزوده شده و باعث پایین آوردن خط انجماد گوشته و غنی شدگی آن شده است بررسی‌ها همچنین نشان می‌دهد که ماگمای اولیه خود از برخی عناصر غنی شده بوده است. این ماگما به احتمال زیاد طی صعود کمی دچار جدایش شده است و سنگ‌های آندزیتی و آندزیت- بازالت پیامد آن هستند.

قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه فردوسی مشهد در ارتباط با طرح پژوهشی شماره ۳/۳۶۷۷۶ تصویب شده در ۹۳/۱۲/۱۴ انجام شده است.

مراجع

[1] Vassigh H., Soheili M., *"Geological map of Sar-E-chah-E-Shur (sheet 7754), Scale 1:100000"*, Geological Survey of Iran (1975).

[2] Karimpour M.H., Stern C.R., Farmer L., Saadat S., Malekezadeh shafaroudi A., *"Review of age, Rb-Sr geochemistry and petrogenesis of Jurassic to Quaternary igneous rocks in Lut Block, Eastern Iran"*, Geopersia 1(2011) 19-36.

[3] Eftekharnejad G., "*Notes on the formation of flysch sedimentary basins in Eastern Iran and its relation to plate tectonic theory, in Stocklin, Eftekharnejad, and Hoshmandzadeh, eds., Primarily investigation on the geology of Lut block, Eastern Iran*", Geological Survey of Iran, Report 22 (1973) 67–71.

[4] Aghanabati A., *"Geology of Iran"*, Geological Survey of Iran, Tehran, (2005) 538 pp, (Persian book).

[DOI: 10.29252/ijcm.26.2.369]

[5] Karimpour M. H., Malekezadeh shafaroudi A., Mazaheri S. A., Hidarian, M. R., "*Magmatism and different mineralization of Cu-Au-Sn-W in Lut block*", The 15th Conference of Iranian Society of Crystallography and Mineralogy, Ferdowsi University of Mashhad, Iran (2007) 598-604.

[6] Pang K.N., Chung S.L., Zarrinkoub M.H., Khatib M.M., Mohammadi S.S., Chiu H.Y., Chu C.H., Lee H.Y., Lo C.H., *"Eocene–Oligocene post-collisional magmatism in the Lut–Sistan region, eastern Iran: magma genesis and tectonic implications"*, Lithos, 180 (2013) 234-251.

[7] Malekzadeh shafaroudi A., Karimpour M.H., Mazaheri S.A., *"Geology, alteration, mineralization and geochemistry of MA-II region, Maherabad porphyry copper-gold prospect area, South Khorasan province"*, Iranian Journal of crystallography and mineralogy 17 (2010) 639-654, (in Persian with English abstract).

[8] Abdi M., Karimpour M.H.,*"Petrochemical Characteristics and Timing of Middle Eocene Granitic Magmatism in Kooh-Shah, Lut Block, Eastern Iran"*, Acta Geological SINICA, 87 (2013) 1032-1044.

[9] Malekzadeh shafaroudi A., Karimpour M.H., Stern C.R., *" The Khopik porphyry copper prospect, Lut Block, Eastern Iran. Geology, alteration and mineralization, fluid inclusion, and oxygen isotope studies"*, Ore Geology, 65 (2015) 522 – 544.

[10] McKenzi D., O'Nions R.K., *"Partial melt distribution from inversion of rare earth element concentrators"*, Journal of Petrology, 32 (1991) 1021-1091.

[11] Shelly D., *"Igneous and Metamorphic Rocks under the Microscope: Classification, Textures, Microstructures and Mineral Preferred Orientation"*, Springer, London (1993) 445.

[12] Kawabata H., Shuto K., *"Magma mixing recorded in intermediate rocks associated with high-Mg andesites from the Setouchi volcanic belt, Japan: implications for Archean TTG formation"*, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 140 (2005) 241-271.

[13] Whitney D.L., Evans B.W., *"Abbreviations for names of rock-forming minerals"*, American Mineralogist, Volume 95 (2010) 185–187.

[14] Le Bas M.J., Le Maitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B., *"A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram"*, Journal of petrology, 27 (1986) 745-750.

[15] Winchester J.A., Floyd P.A.,*"Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation protextures and setting of VMS mineralization in the Pilbara ducts using immobile elements"*, Journal of Chemical Geology 20 (1977) 325-344.

[16] Pearce, J.A., "Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorpe, R.S. (Ed.), Andesites", Wiley, (1982) 525-548.

[17] Shand S.J., *"Eruptive rocks; their genesis, composition, classification and their relation to ore-deposits"*, Hafner Publishing Company, New York, (1947) 448.

[18] Boynton W.V., *" Cosmochemistry of the rare earth elements; meteorite studies. In: P. Henderson (Editor), The rare earth element geochemistry"*, Elsevier, Amsterdam, (1984) 115-1522.

[19] Wilson M., *"Igneous petrogenesis. Uniwin Hyman, London"*, 466 pp.

[20] Rollinson, H., *" Using geochemical data: evolution, presentation, interpretation"*, Longman Scientific and Technical, (1989) 248.

[21] Helvacı C., Ersoy E.Y., Sözbilir H., Erkül F., Sümer Ö., Uzel B., *"Geochemistry and 40Ar/39Ar geochronology of Miocene volcanic rocks from the Karaburun Peninsula: Implications for amphibole-bearing lithospheric mantle source, western Anatolia"*, Volcanology and Geothermal Research 185 (2009) 181–202.

[22] Gill R., *"Igneous rocks and processes"*, Wiley-Blackwell, New Jersey, (2010) 428.

[23] Sun S.S., McDonough W.F., *"Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: A.D. Saunders and M.J. Norry (Editors), Magmatism in the Ocean Basins"*, Geological Society of London (1989) 313–345.

[24] Sajjona F.G., Maury R.C., Bellon H., Cotten J., Defant M., *"High Field Strength Element Enrichment of Pliocene—Pleistocene Island Arc Basalts, Zamboanga Peninsula, Western Mindanao (Philippines)"*, Journal of petrology, 37 (1996) 693-726.

[25] Nicholson K. N., Black P. M., Hoskin P. W. O., Smith I. E. M., *"Silicic volcanism and back-arc extension related to migration of the Late Cainozoic Astralian-Pacific plate boundary. In: Asiabanha. A., Ghasemi. H. and Meshkin. M.,*

[DOI: 10.29252/ijcm.26.2.369]

depletions in central Nicaragua" Earth and Planetary Science Letters, 192 (2001) 533-543.

[34] Gust D.A., Arculus R.A., Kersting A.B., *"Aspects of magma sources and processes in the Honshu arc",* The Canadian Mineralogist, 35 (1977) 347-365.

[35] Thieblemont D.,Tegyey M., *"Geochemical discrimination of differentiated magmatic rocks attesting for the variable origin and tectonic setting of calc-alkaline magmas",* Comptes Rendus De L Academie Des Sciences Serie II, 319 (1994) 87-94.

[36] Asiabanha, A., Bardintzeff, J.M., Kananian, A., Rahimi, G., "Post-Eocene volcanics of the Abazar district, Qazvin, Iran: Mineralogical and geochemical evidence for a complex magmatic evolution", Journal of Asian Earth Sciences, 45 (2012) 79–94.

[37] Kuscu, G.G., Geneli, F., *"Review of post-collisional volcanism in the central Anatolian volcanic province(Turkey), with special reference to the Tepekoy volcanic complex",* International Journal of Earth Sciences, 99 (2010) 593-621.

[38] Pearce J.A., *"Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: Continental basalts and mantle xenoliths (Eds. Hawkesworth, C. J. and Norry, M. J.)"* (1983) 230-249.

[39] Stern R.J., *"Subduction zones"* Reviews of Geophysics 40 (2002) 1012-1054.

[40] McCulloch M.T., Gamble J.A., *"Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism",* Earth and Planetary Science Letters 102 (1991) 358-374.

[41] Wood D.A., *"The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province"*, Earth Planet. Sci. Lett., 50 (1980) 11-30.

[42] Aldanmaz E., Pearce J.A., Thirlwall M.F., Mitchell J.G., *"Petrogenetic evolution of late Cenozoic, post-collision volcanism in western Anatolia, Turkey"* Journal of Volcanology and Geothermal Research, 102 (2000) 67–95.

[43] Shaw D.M., *"Trace element fractionation during anataxis",* Geochimica et Cosmochimica Acta, 34 (1970) 237-243.

2009. Paleogene continental-arc type volcanism in NorthQazvin, North Iran", facies analysis and geochemistry. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung. v. 186/2; (2004) p. 201-214.

[26] Tamura Y., Yuhara M., Ishii T., Irino N., Shukuno H., *" Andesites and Dacites from Daisen Volcano, Japan: Partal-to-Total remelting of an andesite Magma Body ",* Journal of Petrology. V. 44; n. 12(2003) 2243-2260.

[27] Tepper J.H., Nelson B.K., Bergantz G.W., Irving, A.J.,*"Petrology of the Chilliwack atholith, North Cascades, Washington: generation of calc-alkaline granitoids by melting of mafic lower crust with variable water fugacity",* Contributions to Mineralogy and Petrology, 113 (1993) 333-351.

[28] Peters T.J., Menzies M., Thirlwall M., Kyle, P., *"Zuni-Bandera volcanism, Rio Grande, USA – melt formation in garnet- and spinel facies mantle straddling the asthenosphere-lithosphere boundary"*, Lithos, 102 (2008) 295–315.

[29] Dampare S.B., Shibata T., Asiedu D.K., Osae S., Banoeng-Yakubo B., *"Geochemistry of Paleoproteozoic metavolcanic rocks from the southern Ashanti volcanic belt, Ghana: Petrogenetic and tectonic setting implication",* Percambrian Res, 162 (2008) 403-423.

[30] Edward C.M.H., Menzies M.A., Thirlwall M.F., Morrid J.D., Leeman W.P., Harmon R.S., *"The transition to potassic alkaline volcanism in island arcs: the Ringgite-Beser Complex, East Java",* Journal of Petrology, 35(1994): 1557-1595.

[31] Saunders A.D., Storey M., Kent R.W., Norry M.J., *"Consequences of plume–lithosphere interactions. In: B.C. Storey, T. Alabaster and R.J. Pankhurst (Editors), Magmatism and the Causes of Continental Break-u*p", Geological Society London Special Publication, (1992) 41–60.

[32] Nagudi N., Koberl Ch., Kurat G., *"Petrography and Geochemistry of the sigo granite, Uganda and implications for origin",* Journal of African earth Sciences, 36 (2003) 1-14.

[33] Walker J.A., Patino L.C., Carr M.J., Feigenson M.D., *"Slab control over HFSE*

[DOI: 10.29252/ijcm.26.2.369]